

**DETECCIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA EN EL SECTOR “PIEDRA SENTADA” (VEREDA SANTA
LUCIA) CAUCA, COLOMBIA**



MARÍA ALEJANDRA SOCARRÁS MORENO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA GEOMÁTICA

BOGOTÁ D.C

Junio de 2018

DETECCIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA EN EL SECTOR “PIEDRA SENTADA” (VEREDA SANTA LUCIA) CAUCA, COLOMBIA

DETECTION OF HYDROTHERMAL ALTERATIONS THROUGH REMOTE SENSING IN THE SECTOR “PIEDRA SENTADA” (VEREDA SANTA LUCIA) CAUCA, COLOMBIA

María Alejandra Socarrás Moreno

Ing. Geóloga, Aspirante a Especialista en Geomática, Facultad de Ingeniería,
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia
U3101411@umng.edu.co

RESUMEN

En el presente estudio se muestran algunas de las tantas aplicaciones del sensor Landsat en el campo de la geología. Al recorte de una imagen Landsat 8 del año 2016 del sector conocido como “Piedra Sentada” le fue aplicada una de las técnicas de percepción remota más usada “índice de vegetación normalizada”, esto con el fin de estimar el porcentaje de vegetación y tener una aproximación a las condiciones del área de interés. La otra técnica empleada en este artículo fue el análisis de componentes principales, llevada a cabo con el fin de delimitar las posibles zonas con presencia de alteración hidrotermal, para ello fue indispensable tener en cuenta las propiedades espectrales de los dos grupos de minerales evaluados (arcillas y óxidos de hierro) los cuales proporcionaron los parámetros necesarios para seleccionar las bandas de entrada que tendrían lugar en la generación de las componentes. Para el grupo de las arcillas únicamente se tuvieron en cuenta las bandas 2, 5, 6, 7 OLI y se generaron imágenes de cuatro, tres y dos componentes, mientras que para el grupo de los óxidos se incluyeron las bandas 2, 4, 5, 6 OLI para llevar a cabo el análisis y generación de una imagen de cuatro componentes. Finalmente se pudo establecer que las zonas con altos índices de vegetación como la evaluada no proporcionan las mejores condiciones para llevar a cabo este tipo de estudios.

Palabras Clave: Imagen Landsat 8, zonas de alteración hidrotermal, análisis de componentes principales, índice de vegetación normalizada, arcillas, óxidos de hierro.

ABSTRACT

The present study shows some of the many applications of the Landsat sensor in the field of geology. When a Landsat 8 image of the year 2016 of the sector known as "Piedra Sentada" was cut, one of the most widely used remote sensing techniques was applied to the "normalized vegetation index", this in order to estimate the percentage of vegetation and have an approximation to the conditions of the area of interest. The other technique used in this article was the analysis of main components, carried out with the purpose of delimiting the possible zones with the presence of hydrothermal

alteration, for this it was indispensable to take into account the spectral properties of the two groups of minerals evaluated (clays and iron oxides) which provided us with the necessary parameters to select the input bands that would take place in the generation of the components. For the group of clays only bands 2, 5, 6, 7 OLI were taken into account and four, three and two component images were generated, while bands 2, 4, 5 were included for the group of the oxides. , 6 OLI to carry out the analysis and generation of a four component image. Finally, it could be established that areas with high vegetation indexes such as the one evaluated do not provide the best conditions to carry out this type of studies.

Keywords: Landsat image 8, hydrothermal alteration zones, principal components analysis, normalized difference vegetation index (NDVI), clays, iron oxides.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, son pocos los estudios e investigaciones realizados sobre las manifestaciones hidrotermales extendidas a lo largo y ancho del territorio Nacional; esta situación podría estar ligada al avance paulatino en las etapas de exploración de recursos geotérmicos sumado a la falta de caracterización y modelamiento de los mismos. Múltiples factores podrían asociarse a esta problemática pero es de resaltar que uno de los principales inconvenientes está relacionado con la dificultad para acceder a aquellas zonas con potencial geotérmico debido a su compleja topografía, falta de infraestructura vial o altos costos por campañas de campo, sin embargo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta de primera mano a la hora de ejecutar este tipo de estudios, dado que no requiere la presencia física del profesional en el terreno.

La información que se obtiene a partir de las técnicas de percepción remota y el tratamiento digital que se realiza sobre imágenes satelitales se mantiene a través del tiempo como uno de los ejes principales a la hora de generar cartografía temática en diferentes ramas de la geología; los profesionales relacionados con la geotermia han empleado imágenes Landsat y Aster para estudios mineralógicos y litológicos obteniendo muy buenos resultados. Así mismo a partir del

lanzamiento del satélite Landsat 8 y la inclusión de sus dos sensores de observación terrestre Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS), se ha logrado recopilar imágenes con nueve bandas del infrarrojo visible y dos bandas térmicas de onda larga del infrarrojo cercano, dichas bandas tienen un alto rendimiento de radiómetro de señal a ruido que permite la cuantificación de datos de 12 bits, lo que proporciona así una mejor caracterización de la cobertura terrestre, esto ha permitido que en estudios anteriores se identificar y caracterizar zonas con alteraciones hidrotermales de manera mucho más fácil aplicando técnicas como: Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar las firmas espectrales que se registran por los minerales o la combinación y el cociente entre bandas para determinar la distribución espacial de las concentraciones minerales que estén afectando la roca.

Los tipos de alteración hidrotermal se presentan como una respuesta mineralógica, química y textural a los cambios ambientales e interacción con fluidos termales (diferentes temperaturas y pH) que experimenta la roca. Esta clase de fluidos actúan también como transportadores de metales y compuestos que en algunas alteraciones pueden estar directamente asociadas a mineralizaciones metálicas. Para (Meyer y Hemley, 1967) fue indispensable asignar una clasificación particular a las alteraciones hidrotermales, sin embargo solo existen tres de ellas que son fácilmente identificables con el método (ACP): La alteración

argílica, alteración selicítica y la silicificación, la explicación correcta para esto sería que este tipo de alteraciones están compuestas por minerales cuya firma espectral se encuentra en el rango del infrarrojo medio, también pueden llegar a identificarse zonas de oxidación asociadas a algún tipo de alteración a partir de sus firmas espectrales registradas en el espectro visible.

El presente artículo consiste en evaluar el comportamiento de las bandas de una imagen Landsat-8 aplicando diferentes técnicas de percepción remota como lo son: el procesamiento de imágenes, el análisis de componentes principales y la relación entre bandas con el fin de delimitar áreas con alteraciones hidrotermales y así obtener una herramienta de apoyo a la hora de ejecutar la etapa de prospección para una zona con presencia de recursos geotérmicos con topografía compleja y vegetación densa como lo es el sector conocido como Piedra Sentada situado en la cordillera Central, el cual constituye una de las franjas metalógenicas más importantes del departamento de Cauca, a pesar de que se presume la existencia de múltiples depósitos minerales se cuenta con muy pocos estudios de esta zona, sumado a esto en Colombia aún son desconocidos los beneficios de analizar y cartografiar alteraciones hidrotermales a partir de las técnicas mencionadas inicialmente que permiten extraer la mayor información posible de las bandas de la imagen y discriminar la redundante como se realizó en este caso.

LOCALIZACIÓN

El área de interés para el desarrollo de esta investigación se localiza en el departamento del Cauca, específicamente en la vereda Santa Lucía del municipio de La Sierra. Una de las principales vías de acceso al área es a través de la Troncal de Occidente, carretera que atraviesa de norte a sur el departamento, se extiende hacia el norte con el

Departamento de Valle del Cauca y hacia el sur con Nariño. Esta vía corta una pequeña parte de la esquina noroccidental del área de estudio, permitiendo acceso a la altura del sector conocido como El Mango, en la vereda La Depresión del municipio de La Sierra. En esta zona se desprende un carreteable que conduce hacia la Cabecera Municipal de La Sierra y que atraviesa el área de estudio de Occidente a Oriente, permitiendo un buen acceso a la vereda Santa Lucía.



Figura. 1. Localización del área de estudio, Municipio de la Sierra (Cauca, Colombia).
Fuente: Elaboración propia.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Geológicamente el área de interés se localiza en el mega terreno geológico denominado Cauca-Romeral, ubicado entre la falla del río Cauca al Oeste y el Sistema de Fallas de Romeral al Este. Esta mega estructura indica el límite o sutura entre las placas tectónicas del Pacífico al Oeste y la placa Suramericana al Este. “El terreno Cauca – Romeral se encuentra conformado de escamas o fragmentos de corteza oceánica de arcos de islas, depósitos de fosa, fragmentos de corteza continental y fragmentos de manto acrecentados, emplazados y juxtapuestos en tiempos diversos y distintos procesos”. (Etayo, 1983).

1. DATOS

Los datos empleados para el desarrollo de este artículo consistieron básicamente en

una imagen Landsat 8 adquirida del portal web del United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer y un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 30m, los insumos anteriormente mencionados se obtuvieron teniendo en cuenta la ubicación del área de interés. La información fue procesada en el software PCI Geomática 2016. La imagen Landsat 8 OLI-TIRS seleccionada se identificó introduciendo al geoportal la ubicación departamental de la zona de estudio y un polígono en formato shapefile que cubre con precisión dicha área, ambos conformaron los parámetros de búsqueda que permitieron el despliegue de las imágenes disponibles en la interfaz de Earth Explorer donde finalmente se escogió la imagen con mejores características espectrales.

2. METODOLOGÍA

2.1 Pre-procesado

En esta fase se empleó el programa PCI Geomática para procesar una imagen Landsat 8 adquirida el 25 de agosto de 2016, con un ángulo de elevación solar de 61.58142377 y un ángulo acimutal solar de 70.43080828, a partir de este insumo se generó un nuevo archivo al cual se le adhirieron las bandas espectrales de interés con la herramienta traslate (Export). Este proceso se realizó para adquirir una imagen multiespectral y una imagen pancromática en formato .PIX.

Para convertir los valores de radiancia a valores de reflectividad de la imagen multiespectral, se utilizaron las herramientas del workflow ATCOR; primero para corregir el efecto de la atmósfera en los valores de reflectividad y segundo para aplicar la corrección topográfica mediante un Modelo Digital de Elevación con resolución de 30m, de esta manera fueron corregidos los valores de reflectividad ocasionados por el efecto

topográfico, teniendo en cuenta el fuerte relieve de la zona. Contando con una imagen corregida se establecieron prioridades y se delimitó la unidad de trabajo a un área de interés (AOI).

2.2 Procesado

El estudio tiene un objetivo claro: detectar las alteraciones minerales, sin embargo previo a esto se consideró pertinente calcular el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) para estimar la vegetación existente en la zona de interés. Este índice es el más usado por tener la capacidad de minimizar los efectos topográficos y a su vez producir una escala de medida lineal. Al calcular este índice sobre el área de estudio, el resultado fue el siguiente:

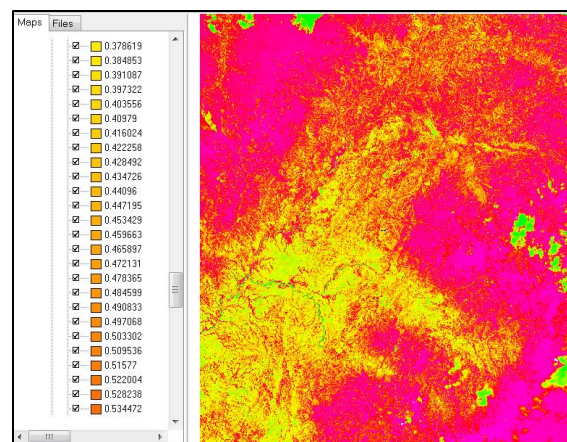


Figura. 2. Imagen del área de interés (AOI) con el cálculo del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se puede observar que las zonas con mayor presencia de vegetación tienen los valores más altos (positivos) del NDVI y están representados por el color magenta y los tonos rojizos, por otro lado las zonas con suelos desnudos y vegetación rara presentan valores positivos (no muy elevados) y algunos valores negativos, estas zonas se encuentran representadas por el

color amarillo y el color verde. En este caso la vegetación densa cubre la mayor parte de la zona de estudio, sin embargo se aprecian en el centro de la imagen un porcentaje considerable de suelos desnudos. Para determinar las zonas con presencia de alteraciones hidrotermales aplicando la técnica ACP se emplearon únicamente aquellas bandas que cubren el infrarrojo medio y las bandas del visible, basados en el método propuesto por (Ruiz J y Prol R, 1995) que representa las características espectrales de las bandas para reflectancia y absorción en: óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación, para imágenes Landsat 7 y Landsat 8 (Tabla 1).

Tabla 1. Características espectrales para óxidos de hierro, hidroxilos y vegetación en Landsat 7 (TM) y Landsat 8 (OLI).

MATERIAL ES	REFLECTANCIA	ABSORCIÓN
Minerales arcillosos	TM5*(OLI 6)	TM7* (OLI 7*)
Óxidos de hierro	TM3* TM2 TM1 (OLI 4* OLI 3 OLI 2)	TM2 TM1 (OLI 3 OLI 2)
Vegetación	TM4* TM2 TM5 TM7 (OLI 5* OLI 3 OLI 6)	TM3 TM1 (OLI 4 OLI 2)

Fuente: Modificado de Ruiz y Prol, 1995.

A partir de la metodología seguida en el trabajo de (Bragado J. G Rejas M. Marchamalo y J. Bonatti, 2009), se establecieron varias componentes principales para la identificación de minerales arcillosos y de óxidos de hierro como se muestra en la tabla 2, basados en ellas se generaron las imágenes para cada grupo con el propósito de tener la herramienta necesaria para determinar cuál es la componente principal de mayor contraste espectral del tipo reflexión y la componente con mayor contraste de absorción. Para generar el resultado de las componentes propuestas, se empleó el algoritmo “Principal Component Analysis (PCA)” de la librería de PCI

Geomática 2016 (Figura. 3), el resultado adecuado de este proceso se obtiene al seleccionar únicamente las bandas que van a conformar cada componente.

Tabla 2. Análisis de Componentes Principales propuestas para el área de estudio.

Zonas de alteración Hidrotermal	Tipo de componentes	Bandas OLI
Arcillosa o fílica	Cuatro Componentes (CP4)	2 5 6 7
	Tres Componentes (CP3)	5 6 7
	Dos Componentes (CP2)	6 7
Oxidación	Cuatro Componentes (CP4)	2 4 5 6

Fuente: Basado en Delendatti, 2003 (Delendatti G, 2003).

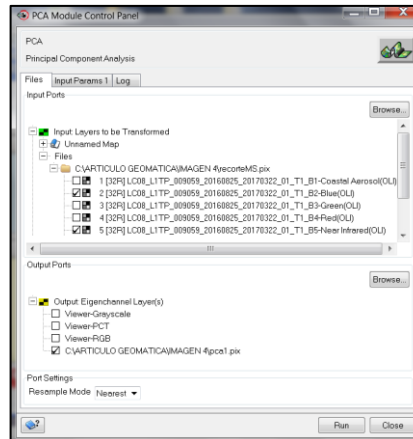


Figura 3. Procedimiento para realizar Análisis de componentes principales selectivo.

Fuente: Elaboración propia.

El proceso anterior se llevó a cabo para cada una las componentes propuestas en la tabla 2, se generaron 4 archivos en formato .pix con las bandas seleccionadas, su análisis se llevó a cabo de forma individual con el fin de seleccionar la imagen con mayor porcentaje

de representación para las arcillas y para los óxidos. Finalmente se aplicará una combinación RGB de Crosta para evidenciar la presencia de materiales alterados en la imagen seleccionada, una combinación como la mencionada se basa en agregar al canal rojo la imagen seleccionada para las arcillas, una imagen producto de la suma de arcillas y óxidos en el canal verde y la imagen de los óxidos de hierro en azul, de esta forma se obtiene una imagen en falso color que reúne todos los resultados (Crosta C. De Souza-Filho F. Azevedo y C. Broie, 2003).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar las correcciones atmosférica y radiométrica se obtuvo una imagen con las características óptimas para continuar con el objeto del estudio; las mejoras de la imagen se lograron al convertir los niveles digitales a niveles de reflectancia; este resultado se evidenció notablemente al comparar los valores del pixel en donde la imagen corregida presentó valores mucho más pequeños que los de la imagen original, también aquellas zonas con presencia de nubes fueron atenuadas gracias a la herramienta hazel removal and cloud masking. Realizar este tipo de correcciones es indispensable en el procesamiento de una imagen para el análisis de componentes principales o cualquier otro estudio.

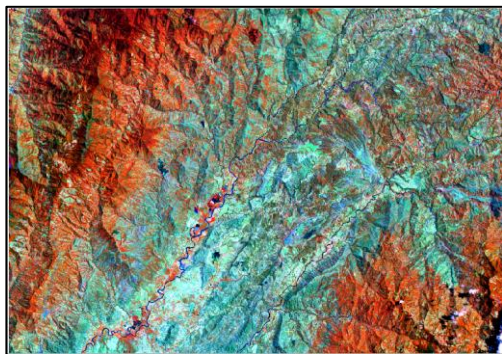


Figura 4. Imagen con corrección atmosférica y radiométrica.

Fuente: Elaboración propia.

ACP Arcillas

Al caracterizar las arcillas con 4 componentes principales (2, 5, 6, 7) y analizar la matriz de covarianza que se genera a partir de este proceso, se identificó que la componente con el mejor resultado fue la CP4 (OLI 7) con una varianza de 0.46 %, mientras que la CP1 (OLI 2) se identifica como la componente que representa la mayor cantidad de información procesada respecto a la imagen original, con una varianza del 71%. Esta información es fácil de corroborar al compararla con los Eigenvalues en los que la CP4 representa la componente de mayor contraste, dado que contiene el menor valor de longitud respecto a las demás componentes. La imagen obtenida a partir de la componente CP4 muestra mayor realce al compararla con las otras tres componentes, únicamente se comparó de forma visual con la CP3 teniendo en cuenta que estas son las que tienen mayor relevancia en los resultados obtenidos para variancia y eigenvalues, finalmente se identificó que la imagen de la CP3 aún esta enmascarada por la niebla y la nubosidad que se apreció en la imagen original, por esta razón se descartó su selección para caracterizar arcillas.

Input Channels:	1	2	3	4	
Output Channels:	5	6	7	8	
Eigenchannels:	2	5	6	7	
Sample Size	:	5529580			
Channel		Mean	Deviation		
1		8.29734	4.66435		
2		28.9488	6.42701		
3		23.6461	7.83389		
4		14.0074	6.25883		
Covariance Matrix for input channels:					
	1	2	3	4	
1	21.76				
2	11.15	41.31			
3	23.16	17.49	61.37		
4	21.78	9.398	46.91	39.17	
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	%Variance		
1	116.4	10.79	71%		
2	35.62	5.968	22%		
3	10.82	3.289	6.6%		
4	0.746	0.8637	0.46%		
Eigenvectors of covariance matrix (arranged by rows):					
	0.3342	0.2836	0.7054	0.5571	
	0.03254	0.9452	-0.1843	-0.2674	
	-0.8943	0.09786	0.4324	-0.06081	
	0.2958	-0.1285	0.5306	-0.7839	

Figura 5. Matriz de covarianza de cuatro componentes principales (2, 5, 6, 7 OLI) para las arcillas de la imagen.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa que los pixeles que tienen más posibilidades de contener arcillas se aprecian en tonos muy claros y fueron delimitados con polígonos rojos, se podría establecer que en estas zonas existe la probabilidad de encontrar alteraciones de tipo argílica-fílica o con contenido mineral del grupo de hidroxilos, sin embargo es importante aclarar que esta identificación podría variar al realizar verificación en campo, teniendo en cuenta las condiciones de vegetación que presenta el área de estudio. Según el resultado obtenido a partir del NDVI las zonas demarcadas podrían corresponder a suelos desnudos o cubiertos de vegetación rara; también se aprecian otras áreas que podrían determinarse a primera vista como zonas arcillosas pero en realidad al analizar la imagen corresponden a zonas de vegetación con alta concentración de humedad y láminas de agua.

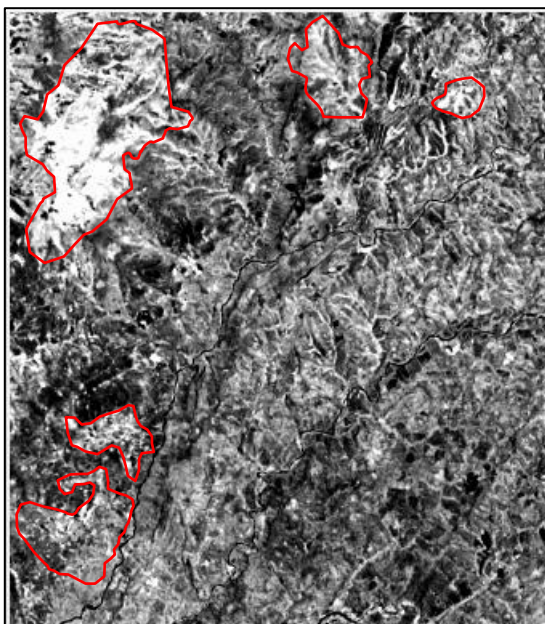


Figura 6. Combinación en escala de grises de la CP4 (2, 5, 6, 7 OLI) para las arcillas. En polígonos rojos las zonas interpretadas como de probable alteración hidrotermal.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado la imagen que arrojo la CP3 (tres componentes principales) empleando las bandas 5, 6 y 7 OLI, generó un resultado con diferencias notorias en comparación con el análisis de cuatro componentes. La imagen generada para esta combinación no permitió llevar a cabo una buena caracterización de arcillas en el área de estudio, a pesar de los resultados que arrojó la matriz de covarianza (figura 7) en donde se observó que los valores de la componente CP3 (OLI 7) son bajos tanto en varianza como en eigenvalues y la Componente CP1 (OLI 5) sintetiza la mayoría de la información procesada respecto a la imagen original con una varianza del 74%, la imagen de las tres componentes presento tonalidades muy oscuras y brillo casi nulo debido al alto porcentaje de vegetación de la zona. A raíz de este resultado la componente CP4 sigue representando la mejor opción.

Input Channels:	1	2	3
Output Channels:	4	5	6
Eigenchannels	5	6	7
Sample Size	5529580		
Channel	Mean	Deviation	
1	28.9488	6.42701	
2	23.6461	7.83389	
3	14.0074	6.25883	
Covariance Matrix for input channels:			
	1	2	3
1	41.31		
2	17.49	61.37	
3	9.398	46.91	39.17

Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	%Variance
1	104.5	10.22	74%
2	35.59	5.966	25%
3	1.729	1.315	1.2%

Eigenvectors of covariance matrix (arranged by rows):

0.2959	0.7554	0.5847
-0.9503	0.1705	0.2607
0.09721	-0.6327	0.7682

Figura 7. Matriz de covarianza para tres componentes principales (5, 6, 7 OLI) para las arcillas de la imagen.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente para la caracterización de las arcillas se tenía establecido en la tabla 2 la generación de dos componentes principales (6, 7 OLI), en este caso al dejar por fuera la banda 5 se obtuvo un mejor resultados al ser

comparado con el análisis de tres componentes, sin embargo, al analizar la matriz de covarianza (figura 8) se observó que los valores de varianza y eigenvalues se encuentran por encima de lo establecido generando una imagen con demasiado brillo (figura 9), en teoría esto se podría interpretar como múltiples zonas con presencia de minerales arcillosos, pero para este caso podría no estar representando la realidad de la zona de estudio, debido a que el algoritmo PCA aplicado a partir de estas dos bandas puede estar alterado al estar enmascarados.

Input Channels:	1	2		
Output Channels:	3	4		
Eigenchannels :	6	7		
Sample Size :	5529580			
Channel	Mean	Deviation		
1	23.6461	7.83389		
2	14.0074	6.25883		
Covariance Matrix for input channels:				
	1	2		
1	61.37			
2	46.91	39.17		
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	%%Variance	
1	98.47	9.923	98%	
2	2.069	1.438	2.1%	
Eigenvectors of covariance matrix (arranged by rows):				
	-0.7843	-0.6204		
	0.6204	-0.7843		
Scaling Information:				
Eigen Output	----Unscaled----	Deviation	Midpoint	Scale

Figura 8. Matriz de covarianza para dos componentes principales (6, 7 OLI) para las arcillas de la imagen.

Fuente: Elaboración propia.

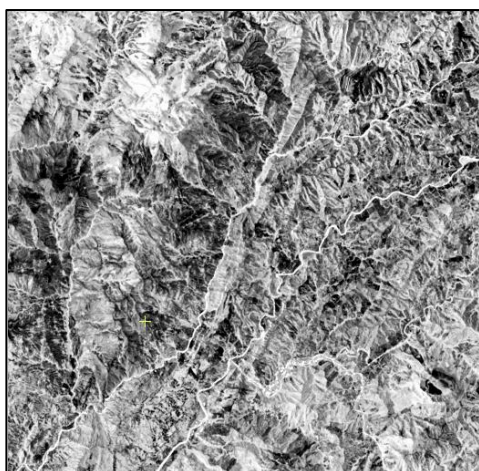


Figura 9. Combinación en escala de grises de la CP2 (6, 7 OLI) para las arcillas.

Fuente: Elaboración propia.

El proceso realizado arroja como resultado que la mejor combinación para la zona de estudio al caracterizar y analizar arcillas es la de cuatro componentes, a pesar de que la combinación de dos componentes también podría ser una buena opción pero para zonas con vegetación escasa.

ACP Óxidos de Hierro

La caracterización de los óxidos de hierro se basa en la firma espectral de la goethita, la jarosita y la hematita (Delendati, 2003). Para esta imagen se aplicaron 4 componentes principales empleando las bandas 2, 4, 5, 6 (OLI) debido a los diferentes intervalos de longitud de onda. El ACP se realizó de la misma forma que en el apartado anterior obteniendo los siguientes resultados:

Input Channels:	1	2	3	4
Output Channels:	5	6	7	8
Eigenchannels:	2	4	5	6
Sample Size:	5529580			
Channel	Mean	Deviation		
1	8.29734	4.66435		
2	7.27223	5.75033		
3	28.9488	6.42701		
4	23.6461	7.83389		
Covariance Matrix for input channels:				
	1	2	3	4
1	21.76			
2	35.06	33.09		
3	11.15	11.25	41.31	
4	23.16	36.54	17.49	61.37
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	%%Variance	
1	108.7	10.43	63%	
2	33.32	5.772	21%	
3	14.79	3.846	9.4%	
4	0.6684	0.8176	0.42%	
Eigenvectors of covariance matrix (arranged by rows):				
	-0.3757	-0.5112	-0.3289	-0.6995
	-0.06429	-0.2201	0.9414	-0.2473
	-0.6351	-0.4283	0.02521	0.6423
	0.6718	-0.7119	-0.07002	0.1923

Figura 10. Matriz de covarianza para cuatro componentes principales (2, 4, 5, 6 OLI) para los óxidos de hierro de la imagen.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la matriz de covarianza se observó que no se obtuvieron resultados idóneos (figura 10), la CP3 y la CP4 a pesar de mostrar fuerte contraste a nivel numérico, no expusieron resultado alguno a nivel de imagen; la CP1 y la CP2 si presentaron resultado a nivel de imagen pero con tonalidades demasiado oscuras que no

permitieron su interpretación. Esta situación podría estar ligada a las condiciones o características de la zona de estudio, donde el alto contenido de vegetación dificulta la obtención de resultados. Al no generar la caracterización para los óxidos de hierro se descartó la posibilidad de realizar la unión de componentes de arcillas y óxidos para crear una nueva imagen a la cual se le asignaría una composición RGB de crosta, esto se había planteado inicialmente en la metodología con el fin de obtener una mejor interpretación de los materiales alterados.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se corrobora la capacidad de los datos multispectrales del sensor OLI -TIRS de Landsat para localizar posibles zonas que presenten minerales de alteración hidrotermal, sin embargo en este estudio solo fue posible obtener resultados idóneos para materiales de tipo arcilloso en una de las tres transformaciones de componentes propuestas. Esta componente corresponde a la CP4 que arroja la mejor respuesta permitiendo delimitar e identificar 5 zonas con posible presencia de alteraciones tipo argílica o filica.

Para las alteraciones por óxidos de hierro que son registradas en el infrarrojo visible y que para este caso tenían asignada una combinación de cuatro componentes que incluía la banda 4 OLI, no se obtuvieron resultados favorables; por esta razón la metodología propuesta no pudo ser finalizada.

Como ya se mencionó el análisis de componentes principales arroja resultados para zonas de arcillas, sin embargo esta información podría estar sujeta a errores teniendo en cuenta el alto porcentaje de vegetación que cubre el área de estudio como lo indicó el NDVI; se puede establecer entonces que este tipo de condiciones no resulta favorable al aplicar esta técnica

teniendo en cuenta que el registro espectral de la vegetación enmascara de manera significativa la respuesta espectral del suelo. Bajo estas circunstancias se recomienda aplicar otras técnicas de prospección para yacimientos de tipo hidrotermal.

BIBLIOGRAFÍA

- Bragado, J., Rejas, G., Marchamalo, M. y Bonatti, J. (2009). Delimitación de zonas de alteración hidrotermal en la cordillera volcánica central de Costa Rica mediante imágenes landsat y del sensor simulador master. *XIII Congreso de la asociación Española de teledetección. Calatayud, España*, pp. 265 - 268.
- Crosta, C., De Souza-Filho, F., Azevedo y Broie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal components analysis. *Journal of Remote Sensing*, pp. 4233 - 4240.
- Delendatti, G. (2003). Caracterización De zonas de alteración hidrotermal del río castaño, provincia de San Juan, mediante. *Rev. Asoc. Geol. Argentina*, 58, pp. 97-108.
- Etayo, F. (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *INGEOMINAS Publicación Geológica Especial*, pp. 1-235.
- Meyer, C. y Hemley, J.J. (1967). Geoquímica de depósitos de minerales hidrotermales, pp. 166 - 235.
- Ruiz, J. y Prol, R. (1995). Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física De La*

*Tierra N° 7 Universidad Complutense
De Madrid., pp. 105 - 137.*